



TUGAS AKHIR TF 141581

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL STEAM DRUM BOILER DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN SENSOR

**Ardhiansyah Widhi Harsono
NRP 2413 100 014**

**Dosen Pembimbing
Ir. Ya'umar, M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT TF 141581

***DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL
AT STEAM DRUM LEVEL CONTROL SYSTEM
PAITON POWER PLANT WITH SENSOR FAULT***

***Ardhiansyah Widhi Harsono
NRP 2413 100 014***

***Supervisor
Ir. Ya'umar, M.T.***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017***

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ardhiansyah Widhi Harsono1

NRP : 2413100014

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul *“PERANCANGAN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL STEAM DRUM BOILER DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR”* adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Juli 2017

Yang membuat
pernyataan,

Ardhiansyah Widhi H

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT* CONTROL PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL STEAM DRUM BOILER DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

Oleh:

Ardhiansyah Widhi Harsono
NRP. 2413 100 014

Surabaya, Juli 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing


Ir. Ya'umar, M.T
NIP. 19540406 198103 1 003

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS




Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL *STEAM DRUM* *BOILER* DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Ardhiansyah Widhi Harsono
NRP. 2413 100 014

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|------------------------------------|-------|---------------|
| 1. Ir. Ya'umar, M.T | | Pembimbing |
| 2. Dr. Bambang Lelono W., S.T, M.T | | Ketua Penguji |
| 3. Ir. Ronny Dwi Noriyati,, M.Kes | | Penguji I |
| 4. Ir. Tutug Dhanardono | | Penguji II |

SURABAYA
2017

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL *STEAM DRUM* *BOILER* DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

Nama Mahasiswa : Ardhiansyah Widhi Harsono
NRP : 2413 100 014
Departemen : Teknik Fisika
Dosen Pembimbing : Ir. Ya'umar, MT

Abstrak

Pengendalian *level* air pada *steam drum* sangatlah penting yang mana akan berpengaruh pada laju aliran *feedwater* yang masuk. Untuk menjaga *level* tetap pada *setpoint*, *variable* yang nilainya dimanipulasi adalah laju aliran *feed water* melalui operasi kerja *turbine boiler feed pump*. Tak jarang pada sistem pengendalian *level* terjadi kesalahan pada sensor sehingga kontroler akan mengirim sinyal yang salah kepada *turbine boiler feed pump*. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan *active fault tolerant control (AFTC)* yang mampu bekerja ketika terdapat kesalahan pada sensor dan dapat mempertahankan performansi sistem. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan dari proses yang terjadi pada *steam drum*. Selanjutnya dilakukan perancangan *observer* dimana *gain observer* didapat dengan perhitungan metode *pole placement*. Langkah terakhir adalah merancang rekonfigurasi kontrol. Uji performansi yang diberikan berupa kesalahan sensitivitas dan kesalahan bias. Pada sistem AFTC dengan kesalahan sensitivitas 8% didapatkan nilai *maximum overshoot* 0,71%, *settling time* 20 detik, dan *error steady state* 0,22%. Sedangkan sistem tanpa AFTC didapatkan nilai *maximum overshoot* 9,18%, *settling time* 30 detik, dan *error steady state* 8,78%.

Kata kunci: active fault tolerant control, observer, pole placement, steam drum

Halaman ini sengaja dikosongkan

*DESIGN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL AT STEAM
DRUM LEVEL CONTROL SYSTEM PAITON POWER PLANT
WITH SENSOR FAULT*

*Name : Ardhiansyah Widhi Harsono
Student Number: 2413 100 014
Department : Engineering Physics
Supervisor : Ir. Ya'umar, MT*

Abstract

Water level control in steam drum is very important. This control will influence the feed water flow rate that get inside. To keep the level stay at set point, the manipulated variable is feed water flow rate based on turbine boiler feed pump operation. It is not rare that sensor become error the controller will give wrong signal to turbine boiler feedpump. In this final project is designed an active fault tolerant control (AFTC) that can work even in control valve error operation or there is fault in control valve operation and still can keep the system performance. At first, got the mathematical model of the process id steam drum. Then got the observer when the gain of observer is got from pole placement method. The final step is the reconfiguration control system. The test using sensitivity fault and bias fault. When the AFTC system tested using 8% of sensitivity fault got the value of maximum overshoot is 0,71%, settling time is 20, and error steady state is 0,22% seconds. While system without AFTC got the value of maximum overshoot is 9,18%, settling time is 30 seconds, and error steady state 8,78%.

Key Words: active fault tolerant control, observer, pole placement, steam drum

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'aalamiin, rasa syukur atas segala limpahan rahmat, kesehatan, keselamatan, dan ilmu yang Allah SWT berikan kepada penulis hingga mampu menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul: "*PERANCANGAN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL PADA SISTEM PENGENDALIAN LEVEL STEAM DRUM BOILER DI PLTU PAITON DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR*".

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, tidak terlepas dari semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materiil. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua, yang senantiasa memberikan dukungan moril dan material.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta ST, Msi, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS
3. Bapak Ir. Yaumar M.T selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan saran dan kritiknya.
4. Bapak Abdul Rochim, S.T, selaku instrument and control engineer PT. POMI, PLTU Paiton Unit 7&8 Jawa Timur yang telah membimbing dan memfasilitasi selama pengambilan data lapangan
5. Teman-teman asisten laboratorium rekayasa instrumentasi dan kontrol, dan teman-teman Teknik Fisika 2013 yang senantiasa memberikan dukungan dan fasilitas laboraorium..

Demikian laporan tugas akhir ini dibuat dengan sebaik-baiknya. Semoga laporan ini bermanfaat bagi semua pihak, khususnya untuk kemajuan industri di Indonesia.

Surabaya, Juli 2017
Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1. Steam Drum.....	5
2.2. Sistem Pengendalian <i>Level Steam Drum</i>	6
2.3 Pemodelan Matematis <i>Steam Drum</i>	7
2.4 Fault Tolerant Control (FTC)	8
2.5 Observer State	10
2.7 Penentuan Gain Matriks <i>Observer</i>	14
2.8 Skema Rekonfigurasi Kontrol	15

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Pengambilan Data.....	19
3.2 Pemodelan	22
3.3 Validasi Model	29
3.4 Perancangan Kontroler PI.....	30
3.5 Perancangan Active Fault Tolerance Control (AFTC).....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Uji Kesalahan Sensitivitas.....	39
4.2 Uji Kesalahan Bias	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema dari Proses pada <i>Steam drum Boiler</i>	5
Gambar 2.2	Skema Umum <i>Fault Tolerant Control</i>	8
Gambar 2.3	Struktur Umum <i>Active Fault Tolerant Control</i> ..	10
Gambar 2.4	Skema <i>State Observer</i>	13
Gambar 2.5	Skema Rekonfigurasi Kontrol	15
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian.....	18
Gambar 3.2	Grafik Kesalahan Sensor <i>Level Transmitter</i>	22
Gambar 3.3	Pendekatan dimensi volume tabung	24
Gambar 3.4	Skema Validasi Model	29
Gambar 3.5	Grafik Respon Validasi Model.....	30
Gambar 3.6	Skema Diagram Blok Perancangan Pengendali PI	31
Gambar 3.7	Grafik Respon Perancangan Kontroler PI	31
Gambar 3.8	Skema Perancangan <i>Observer</i>	36
Gambar 3.9	Skema Perancangan Rekonfigurasi Kontrol	37
Gambar 4.1	Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 2%	40
Gambar 4.2	Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 2 %	40
Gambar 4.3	Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 5%	42
Gambar 4.4	Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 5 %	42
Gambar 4.5	Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 8%	44
Gambar 4.6	Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 8 %	44
Gambar 4.7	Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 15%	46
Gambar 4.8	Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 15 %	46

Gambar 4.9	Grafik Respon Kesalahan Bias +0,25%	48
Gambar 4.10	Grafik Perbesaran Kesalahan Bias +0,25%	49
Gambar 4.11	Grafik Respon Kesalahan Bias -0,25%	50
Gambar 4.12	Grafik Perbesaran Kesalahan Bias -0,25%	50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pemodelan <i>Plant</i> Beradsarkan Data Desain <i>Steam Drum</i>	19
Tabel 3.2	Data Pemodelan <i>Plant</i> Berdasarkan Data Lapangan	20
Tabel 3.3	Data Kesalahan Pembacaan Sensor <i>Level Transmitter</i> ...	21
Tabel 4.1	Parameter performansi dengan kesalahan sensitifitas 2% pada kondisi dikenai kesalahan	41
Tabel 4.2	Parameter performansi dengan kesalahan sensitifitas 5% pada kondisi dikenai kesalahan	43
Tabel 4.3	Parameter performansi dengan kesalahan sensitifitas 8% pada kondisi dikenai kesalahan	45
Tabel 4.3	Parameter performansi dengan kesalahan sensitifitas 15% pada kondisi dikenai kesalahan ...	47
Tabel 4.5	Parameter performansi dengan kesalahan Bias +0,25% saat dikenai kesalahan.....	50
Tabel 4.6	Parameter performansi dengan kesalahan Bias -0,25% saat dikenai kesalahan.....	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler merupakan salah satu bagian penting dalam sebuah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). *Boiler* berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan. Uap hasil pemanasan akan digunakan untuk menggerakkan *turbine*. Gerakan *turbine* akan menggerakkan *generator* sehingga dapat menghasilkan listrik. Di dalam *boiler* terdapat salah satu bagian penting yakni *steam drum*, yang berperan sebagai pemisah air dan uap. Di dalam *steam drum*, terdapat sistem pengendalian level untuk menjaga level air pada *set point* yang ditentukan. Hal ini bertujuan untuk menjaga kapasitas produksi dan menjamin proses berjalan pada kondisi normal dan kontinyu.

Menurut Astrom (2000), sistem *steam drum* merupakan sistem yang kompleks, dimana jika terjadi sedikit kesalahan pada komponen sistem, maka akan berdampak besar [1]. Salah satu komponen yang berpotensi terjadi kesalahan pada sistem pengendalian level steam drum adalah *sensor* pada level *transmitter*. Hal ini dikarenakan letaknya yang berada atau bersentuhan langsung dengan lingkungan, berbeda halnya dengan kontroler yang letaknya terlindung dan tidak bersentuhan langsung dengan lingkungan. Jika terjadi kesalahan pembacaan pada *sensor*, maka kontroler akan memberikan sinyal kontrol yang salah kepada aktuator yakni *turbine boiler feed pump* (BFP) yang berfungsi untuk mengatur besar debit aliran *feed water* yang menuju *steam drum* sehingga akan berdampak pada level air di dalam *steam drum*. Jika level air di dalam *steam drum* terlalu tinggi maka akan merusak *separating device* uap-air, namun jika level air di dalam *steam drum* terlalu rendah, maka *boiler* akan mengalami *superheating* sehingga dapat menyebabkan ledakan [2]. Selain itu level pada *steam drum* juga memiliki pengaruh terhadap kapasitas produksi, dimana jika level air terlalu tinggi maka tekanan air akan makin tinggi, sehingga air cenderung susah menjadi uap,

sedangkan jika level air terlalu rendah maka tekanan air akan semakin rendah sehingga air cenderung lebih mudah menjadi uap. Sehingga jika level air di dalam *steam drum* tidak stabil, maka jumlah uap yang menggerakkan turbine tidak stabil, sehingga daya yang dihasilkan generator juga tidak akan stabil.

Proses otomasi di industri sangat memperhatikan keberlangsungan proses yang kontinyu, dan menjaga proses agar selalu berada pada kondisi stabil, serta menghindari kondisi operasi abnormal yang dapat menyebabkan trip. Untuk dapat menangani kondisi operasi abnormal secara otomatis, maka dibutuhkan suatu sistem yang dapat mendeteksi dan mengidentifikasi kesalahan yang terjadi pada kondisi abnormal tersebut untuk kemudian merekonfigurasi sinyal kontrol sesuai dengan kebutuhan. Metode kontrol yang mampu menoleransi perubahan akibat adanya kesalahan dan menjaga performa dan kestabilan sistem adalah *Fault Tolerant Control* (FTC). Menurut Zhang dan Jin (2008), *Fault Tolerant Control* (FTC) merupakan suatu perkembangan teknologi kontrol untuk kebutuhan *safety* dan perbaikan unjuk kerja [3]. *Fault Tolerant Control* terdiri dari 2 tipe, yaitu *active* dan *passive*. *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) bereaksi terhadap kegagalan/kesalahan komponen dengan cara merekonfigurasi aksi kontrol sehingga mampu mempertahankan kestabilan sistem ketika terjadi kesalahan. Pada Tugas akhir ini akan dilakukan perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian *level steam drum boiler* PLTU Paiton dengan kesalahan pada *sensor level transmitter*. Sehingga diharapkan AFTC mampu menolerir kesalahan yang terjadi pada sensor level *transmitter* pada sistem pengendalian *level steam drum*, sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, maka rumusan masalah yang diambil pada tugas akhir ini adalah:

- a. Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian level *steam drum* dengan kesalahan pada sensor.

- b. Bagaimana perbandingan performansi respon sistem pengendali dengan dan tanpa menggunakan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) ketika terjadi kesalahan pada sensor.

1.3 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah disebutkan di atas, maka tujuan tugas akhir ini adalah :

- a. Untuk merancang *active fault tolerance control* (AFTC) pada sistem pengendalian level *steam drum boiler* yang dapat mentoleransi kesalahan pada sensor sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.
- b. Untuk mengetahui perbandingan performansi respon sistem kontroler dengan dan tanpa menggunakan *active fault tolerance control* (AFTC) ketika terjadi kesalahan pada sensor.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

- a. Proses yang ditinjau adalah pengendalian *level steam drum boiler*.
- b. Kesalahan yang terjadi adalah kesalahan pembacaan sensor pada *level transmitter* di *steam drum boiler* berupa kesalahan sensitivitas, dan kesalahan bias.
- c. Sistem kontrol yang digunakan pada proses pengendalian level di *steam drum boiler* menggunakan algoritma PI.
- d. Perancangan *active fault tolerant control* dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB 2013a.
- e. Pengambilan data dilakukan di PLTU Paiton Unit 7 pada tanggal 1 januari - 31 Januari 2017.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika laporan.

BAB II Dasar Teori

Berisi tentang pengertian dan proses *steam drum boiler* sistem kontrol pada *steam drum boiler*, *active fault tolerant control* dan perancangannya.

BAB III METODOLOGI

Berisi tentang langkah-langkah perancangan pengendali PI dan *active fault tolerant control* dengan simulasi pada program MATLAB 2013a.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisis hasil perancangan sistem dengan *active fault tolerant control* dibandingkan dengan hasil sistem tanpa *active fault tolerant control* ketika diberi kesalahan sensitivitas, dan kesalahan bias.

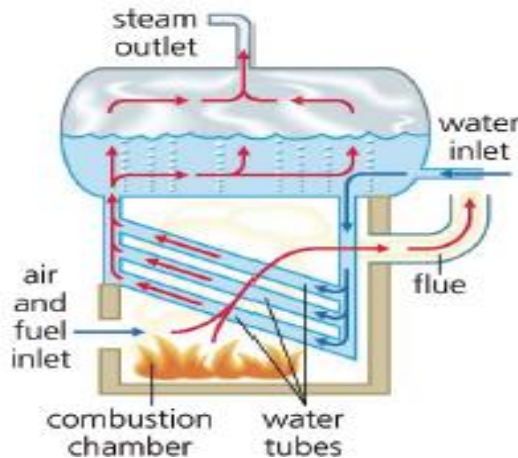
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan hasil yang didapatkan setelah dilakukan perancangan *active fault tolerant kontrol* dan saran.

BAB II DASAR TEORI

2.1. Steam Drum

Pada *steam drum* terdapat dua fasa zat yaitu fasa cair dan gas. Fasa cair adalah air yang nantinya akan diubah menjadi uap dalam bentuk fasa gas. Skema dari proses pada *steam drum boiler* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 2.1. Skema dari Proses pada *Steam drum Boiler*[1]

Air yang akan dievaporasi dimasukkan kedalam *drum*. Air dalam *drum* akan turun melalui pipa-pipa *downcomers*, yang terletak diluar *drum*. Air kemudian menuju pipa-pipa *riser* yang menuju kembali ke *drum*. Pada tahap ini air berevaporasi dengan adanya panas yang ditambahkan ketika air melewati *riser*, uap kemudian naik dan kembali menuju *drum*. Kondisi uap yang berada dibawah air ketika masuk kembali ke dalam *drum* membuat fenomena gelombang pada air sehingga membuat pengendalian *level* pada *steam drum* sulit. Keluaran dari *riser* melewati separator untuk memisahkan antara uap dan air.

Sifat kunci dari *steam drum boiler* adalah terdapatnya perpindahan panas yang sangat efisien pada proses *boiling* dan kondensasi. Semua bagian dari sistem yang terkontak dengan campuran uap-cair jenuh akan berada pada kesetimbangan panas. Energi yang tersimpan didalam uap dan air akan terlepas atau diserap dengan sangat cepat ketika terjadi perubahan tekanan [1].

Kualitas produk *steam* yang dihasilkan oleh *steam drum* erat kaitannya dengan parameter level, temperatur dan tekanan, karena pada setiap tekanan dan temperatur yang berbeda maka massa jenis, dan fase steam yang dihasilkan juga akan berbeda[1]. Sedangkan level air di dalam steam drum akan berpengaruh terhadap tekanan, dimana jika level air semakin tinggi, maka tekanan air semakin besar, demikian pula sebaliknya.

2.2. Sistem Pengendalian *Level Steam Drum*

Sistem pengendalian *level* pada *steam drum boiler* PLTU Paiton Jawa Timur menjaga nilai *level* sebagai variabel proses. Dengan adanya uap yang berada didalam air akibat evaporasi yang terjadi pada *waterwall* melalui pipa *riser*, *level* air pada *drum* juga akan terpengaruh oleh adanya laju aliran uap. Sehingga nilai *level* air pada *steam drum* dipengaruhi oleh nilai laju aliran air (*feed water*) yang masuk ke dalam *drum* dan nilai laju aliran uap yang keluar dari *drum* [4]. Untuk mengendalikan *level* air dalam *drum* digunakan laju aliran air (*feed water*) sebagai variabel manipulasi yang dijaga dengan mengatur debit air melalui operasi *boiler feed pump* (BFP). Besar kecilnya putaran BFP akan ditentukan oleh perbandingan informasi yang didapat melalui *level* transmitter dan *flow transmitter*. Sehingga sistem pengendalian bertingkat (*cascade*) diterapkan dalam sistem pengendalian ini dengan kontrol primer adalah kontrol level dan kontrol sekunder adalah kontrol *flow feed water*. Aksi pengendali yang diberikan pada *steam drum boiler* adalah aksi pengendali PI (*Propotional Integral*).

2.3 Pemodelan Matematis *Steam Drum*

Hukum yang digunakan untuk memodelkan *steam drum* adalah kesetimbangan massa. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah massa yang masuk ke dalam sistem sebanding dengan jumlah massa yang keluar dari sistem serta massa yang terakumulasi dalam sistem itu sendiri. Masukan untuk *steam drum* adalah laju massa air dan keluarannya adalah laju massa uap. Untuk massa yang terakumulasi di dalam *steam drum* menunjukkan level. Ada keluaran yang diabaikan pada pemodelan dari *steam drum* yaitu laju *downcomer*. Ini diabaikan karena nantinya laju *downcomer* akan diumpun balik ke *steam drum* itu sendiri [5].

Hukum kesetimbangan massa yang berlaku sesuai dengan kondisi masukan dan keluaran dari *steam drum* adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \text{laju massa} \\ \text{di dalam} \\ \text{steam drum} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{laju massa} \\ \text{feedwater} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{laju massa} \\ \text{steam} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_w - \dot{m}_v \quad (2.2)$$

$$\frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \dot{m}_w - \dot{m}_v \quad (2.3)$$

$$\frac{d\rho_w V_L}{dt} + \frac{d\rho_v V_v}{dt} = \dot{m}_w - \dot{m}_v \quad (2.4)$$

Dimana:

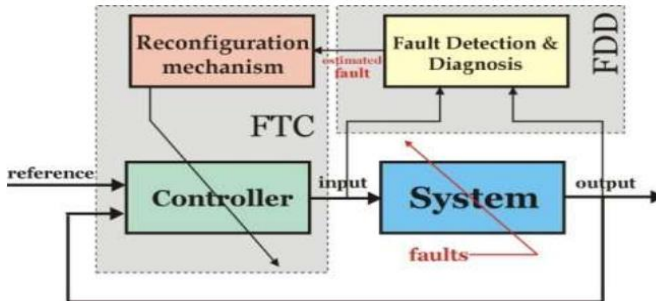
$$\frac{d\rho_w V_L}{dt} = \text{laju perubahan massa liquid (kg/s)}$$

$$\frac{d\rho_v V_v}{dt} = \text{laju perubahan massa vapor (kg/s)}$$

- \dot{m}_w = laju massa *water* input (kg/s)
- \dot{m}_v = laju massa *vapor* output (kg/s)

2.4 Fault Tolerant Control (FTC)

Fault Tolerant Control adalah suatu sistem kontrol yang bekerja saat terjadinya suatu kegagalan atau *failure* pada sensor maupun aktuator. Sistem kontrol ini dibuat untuk mengembalikan kestabilan menuju *set point* semula. Metode pendekatan yang digunakan adalah dengan *reconfiguration control* yaitu dengan menambahkan kontrol saat *fault* terjadi dengan memberi jeda waktu atau *time delay*. Kontrol sistem ini sering juga disebut dengan *Fault Tolerant Control Sistem* (FTCS). FTCS dapat diklasifikasikan pada 2 tipe, yaitu *Passive Fault Tolerant Control Sistem* (PFTCS) dan *Active Fault Tolerant Control Sistem* (AFTCS). PFTCS dirancang untuk mempertahankan sistem dari kegagalan yang terjadi. Sedangkan AFTCS bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga. AFTCS dapat juga disebut *Fault Detection and Identification (Diagnosis)*. Tujuan utama dari FTCS adalah merancang *kontroller* dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan. Tidak hanya ketika kontrol komponen berfungsi secara normal tetapi juga ketika terjadi kegagalan pada komponen yang lain [3].



Gambar 2.2 Skema Umum *Fault Tolerant Control* [6]

Berdasarkan Gambar 2.2, Perbedaan AFTC dan PFTC adalah terletak pada perancangan *fault detection and diagnosis* (FDD) dan *reconfigurable controller* (RC). Sehingga kunci utama pada AFTC adalah merancang kontroller yang dapat direkonfigurasi, skema FDD dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kesalahan dan *robust* terhadap ketidakpastian, dan mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDD [3].

Menurut Zhang dan Jiang (2008), *active fault tolerant control* (AFTC) terdiri atas empat sub sistem, yaitu:

- Reconfigurable Controller* (RC)
- Fault Detection Diagnosis* (FDD) Scheme
- Mekanisme RC
- Command Reference Actuator*.

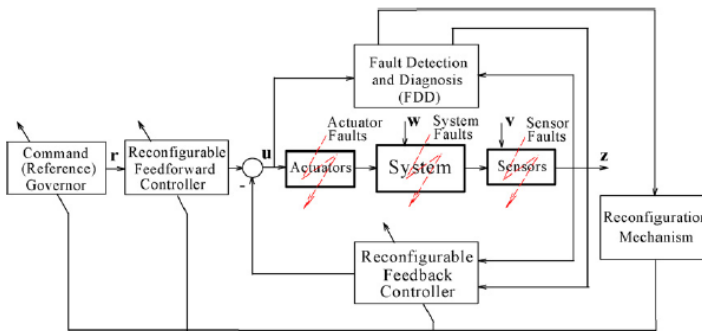
FDD dan RC pada keseluruhan struktur sistem adalah perbedaan utama dari *active fault tolerant control* dibandingkan dengan *passive fault tolerant kontrol*. Tahapan dalam perancangan *active fault tolerant kontrol* adalah sebagai berikut [7]:

- Merancang kontroler yang dapat direkonfigurasi
- Dilakukan perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan aktuator dan/atau sensor
- Merancang skema FDD dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kegagalan dan *robust* terhadap ketidakpastian

model, kondisi operasi yang variatif serta gangguan eksternal, FDD digunakan untuk mengetahui besarnya kesalahan yang terjadi pada sistem tersebut

- d. Merancang mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection*.

Struktur umum dari *active fault tolerant control system* dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3. Struktur Umum *Active Fault Tolerant Control* [3]

2.5 Observer State

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan mengestimasi keadaan (*state*) sistem berdasarkan model matematis sistem. Selain itu *observer* juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem. Mengingat bahwa multivariabel linier *plant* dengan *output* hasil pengukuran direpresentasikan sebagai berikut [8]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.6)$$

Dimana:

A= matriks pada *state*

B = matriks pada kontrol *input*

C = matriks pada hasil pengukuran

x = *state*

u = kontrol *input*

D =*measurement output noise*

Jika di dalam sistem atau plant terjadi kesalahan, maka persamaan 2.5 dan 2.6 akan menjadi persamaan berikut [9].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.7)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.8)$$

Dimana:

F_a = matriks kesalahan aktuator

F_s = matriks kesalahan sensor

f_a = vektor kesalahan aktuator

f_s = vector kesalahan sensor

Tipe kesalahan sensor dimodelkan sebagai:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.9)$$

$$f(t) = s_f(jt) - s(t) \quad (2.10)$$

Dengan $s_f(t)$ adalah sinyal aktual, α dan β adalah konstanta. Penambahan kesalahan $f(t)$ - termasuk $f_a(t)$ dan $f_s(t)$ ditunjukkan pada persamaan (2.24).

Observer dibuat dengan kondisi:

- a. $R_1 \text{ Rank}(C) \geq r + q$
- b. $R_2 \text{ Rank}(CF_{ai}) \geq r$
- c. $R_3 \text{ Rank}(\tilde{A}_a, \tilde{C}_a)$ adalah *observerable*

Untuk q dan r masing-masing adalah akumulasi pangkat matriks A dan C . \tilde{A}_a dan \tilde{C}_a adalah pelebaran matriks A dan C yang merupakan penurunan dari persamaan (2.7) dan (2.8) dari kedua persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = Az(y - z) \quad (2.11)$$

$$\dot{z}(t) = Az(Cx(t) + F_s f_s(t) - z) \quad (2.12)$$

Untuk Az merupakan matriks identitas (I) untuk $Az \in I^q$, sedangkan matriks dari kesalahan sensor dan aktuator didefinisikan sebagai $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$

Dari persamaan di atas, maka dapat didefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi, sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az * C & -Az \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az * F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Dimana:

$$Aa = \begin{bmatrix} A & 0 \\ Az * C & -Az \end{bmatrix}, Ba = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, Ca = \begin{bmatrix} 0 & C \end{bmatrix}, Ea = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & Az * F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari *gain observer* maka dipakia ekspansi matrik melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}'(t) \\ \hat{f}'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ba \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix} [Ca \ 0](Y - \hat{Y}) \quad (2.13)$$

$$\hat{Y} = [Ca \ 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sehingga matriks yang sudah diekspansi ditunjukkan seperti berikut ini:

$$\tilde{A}_a = \begin{bmatrix} Aa & Ea \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_a = [Ca \quad 0]$$

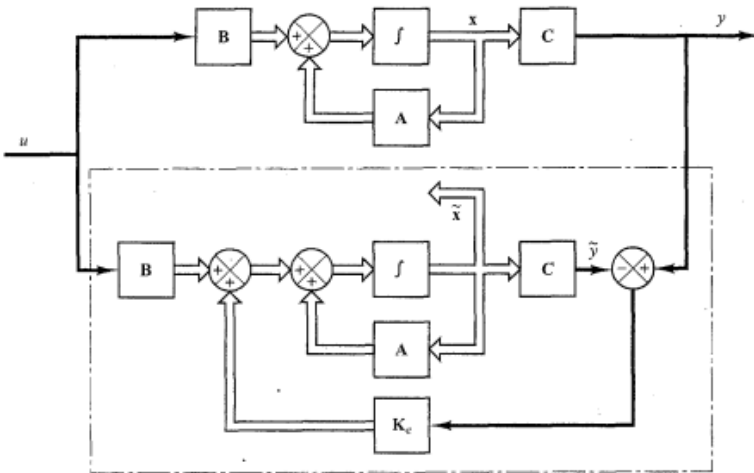
Maka observer akan ditentukan sebagai:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \tilde{A}_a \tilde{x} + Bu + K_e(Y - \tilde{C}_a \tilde{x}) \quad (2.15)$$

Dimana:

$\dot{\hat{x}}$ = menunjukkan state estimasi dari $x(t)$

K_e = gain matriks *observer*



Gambar 2.4 Skema *State Observer* [8]

Berdasarkan gambar 2.4, mekanisme pendeteksian kesalahan pembacaan sensor adalah dengan membandingkan output sinyal pengukuran sensor dengan output pada *observer*. Jika output pengukuran sensor dan output observer nilainya sama, maka tidak terjadi kesalahan pembacaan pada sensor, sehingga menghasilkan nilai estimasi kesalahan sebesar nol. Jika output pengukuran sensor

dan output observer nilai nya berbeda, maka terjadi kesalahan pembacaan pada sensor, sehingga akan menghasilkan nilai estimasi [8].

2.7 Penentuan Gain Matriks *Observer*

Perbedaan kondisi *steady* merupakan perbedaan antara keadaan awal dan keadaan awal estimasi, didefinisikan pada persamaan (2.15), skema *observer* juga ditunjukkan dengan diagram blok yang ditunjukkan pada gambar (2.9).

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}_a \tilde{x} + Bu + K_e(Y - \tilde{C}_a \tilde{x}) \quad (2.16)$$

Dimana :

\tilde{x} =keadaan estimasi

$C\tilde{x}$ =keadaan estimasi keluaran

K_e =Gain matriks *Observer*

Solusi pendekatan untuk mendapatkan nilai *gain matriks observer* adalah dengan menggunakan solusi *Pole Placement* dimana *Pole Placement* adalah metode uji coba peletakan nilai *Pole* (μ_n) yang sesuai. Dengan mensubstitusikan K_e menjadi bentuk polinomial maka akan didapatkan persamaan berikut ini [9].

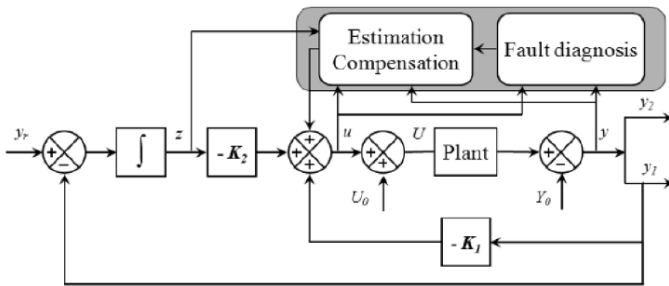
$$|sI - CA - K_e C| = (s - \mu_1)(s - \mu_{n+1})(s - \mu_{n+...}) \quad (2.17)$$

$$K = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1][C^T : A^T C^T : \dots : C^T : (A^T)^{n-1} C^T]^{-1} \phi(A^T) \quad (2.18)$$

$$K_e = K^T = \phi(A^T)^T \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-2} \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.8 Skema Rekonfigurasi Kontrol

Design reconfiguration dari sinyal kontrol akan bekerja secara otomatis agar dapat mengakomodir kesalahan sehingga *plant* tetap beroperasi. Mekanisme rekonfigurasi dirancang yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection*. Gambar 2.4 akan menunjukkan skema rekonfigurasi kontrol [7].



Gambar 2.5. Skema Rekonfigurasi Kontrol [8]

Pada Gambar 2.4, menunjukkan bahwa *estimation compensation* dan *fault diagnosis* adalah bagian dari observer. *Fault diagnosis* bertujuan untuk mendefinisikan kesalahan dengan mendapatkan informasi dari sinyal hasil pengukuran. Selanjutnya informasi diteruskan menuju *estimation compensation* untuk menestimasi kesalahan dengan mendapat sinyal referensi dari sinyal control. Dengan demikian *estimation compensation* dan *fault diagnosis* akan mendapat input berupa sinyal kontrol (u) dan sinyal hasil pengukuran (y). Rekonfigurasi kontrol ini dilakukan dengan menambahkan sinyal kontrol berupa Y . Nilai Y ini didapatkan dari perhitungan sebagai berikut:

$$Y = Y_m - \text{Fault} \quad (2.20)$$

Dimana:

Y = Nilai sebenarnya

Y_m = Nilai hasil pengukuran

$Fault$ = Nilai estimasi kesalahan observer

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

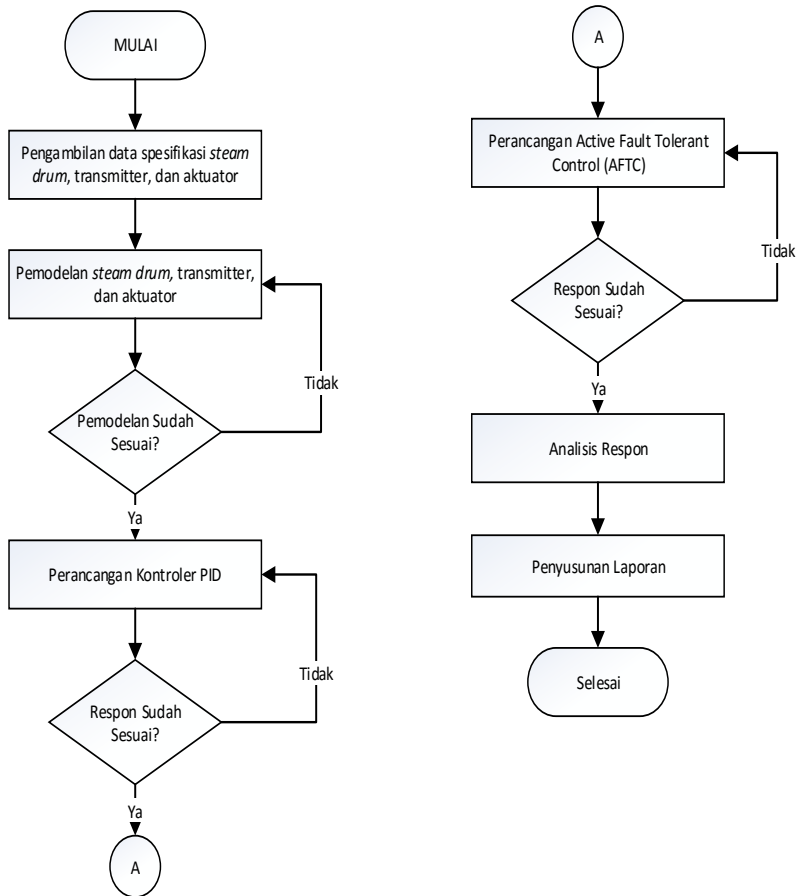
Pada bab ini akan dijabarkan metodologi penelitian yang dilakukan pada Tugas Akhir ini. Metodologi yang dilakukan dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut:

- a. Pengambilan data spesifikasi *steam drum*, sensor dan aktuator meliputi data besaran *input* dan *output* pada *steam drum*, sensor dan aktuator. Pengambilan data dilakukan di PLTU Paiton Unit 7 Jawa Timur pada kondisi beban maksimum 615 MW.
- b. Pemodelan *steam drum*, sensor, dan Aktuator
Pemodelan *Steam drum Boiler*, sensor dan aktuator didapatkan dari data spesifikasi yang telah diambil. Pemodelan *steam drum boiler* menggunakan hukum kesetimbangan massa.
- c. Validasi model menggunakan data *level* pada *steam drum boiler* pada kondisi normal dan mantap yaitu 0.789 m. Model dapat dikatakan valid apabila error yang terjadi $\leq 2\%$.
- d. Perancangan kontrol PI dengan menggunakan metode *trial and error* dengan kriteria *error steady state* $\leq 2\%$.
- e. Perancangan *Active Fault Tolerance Control* (AFTC)
Tahap pertama adalah perancangan *observer* yaitu dengan mengubah fungsi transfer *laplace model* menjadi *state space model* sehingga didapatkan matriks A, B, C, D yang digunakan untuk mendapatkan *gain observer*. Tahap kedua adalah rekonfigurasi kontrol, dimana perancangan ini bertujuan untuk mengembalikan stabilitas kontrol yang tidak stabil akibat kesalahan pada sensor level transmitter dengan mengubah perhitungan sinyal kontrolnya.
- f. Analisis respon dilakukan berdasarkan uji performansi sistem dengan memberikan kesalahan pada sensor level transmitter berupa kesalahan bias, dan sensitivitas, sehingga didapatkan

grafik respon sistem pengendali PI dengan menggunakan dan tanpa menggunakan AFTC,

g. Penyusunan laporan tugas akhir.

Flowchart pengerjaan tugas akhir ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

3.1 Pengambilan Data

3.1.1 Data Spesifikasi *Steam Drum*

Data yang digunakan untuk pemodelan *plant* berupa massa yang masuk dan massa yang keluar *steam drum* serta spesifikasi serta dimensi *steam drum*. Data didapat dari ruang MCR (*Main Control Room*) PT. IPMOMI, PLTU Paiton Jawa Timur Unit 6. Variable yang dikendalikan pada obyek tugas akhir ini adalah *level* air didalam *steam drum*. Variable yang dimanipulasi adalah nilainya untuk memenuhi *set point level* air adalah laju aliran *feedwater* melalui operasi *turbine BFP*.

Tabel 3.1. Data Pemodelan *Plant* Beradsarkan Data Desain *Steam Drum*

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
V_i	Volume <i>Steam drum</i>	77,48 m ³
D	Diameter <i>Steam drum</i>	1,778 m
R	Jari-jari <i>Steam drum</i>	0,889 m
L	Panjang <i>Steam drum</i>	30,0228 m
H	<i>Normal water level</i>	0,789 m
V_v	<i>Volume steam total</i>	24,44 m ³
V_L	<i>Volume water total</i>	53,04 m ³

Tabel 3.2. Data Pemodelan *Plant* Berdasarkan Data Lapangan

Notasi	Keterangan	Nilai dan Satuan
\dot{m}_w	<i>Mass Flowrate Feedwater</i>	488,1 kg/s
\dot{m}_v	<i>Mass Flowrate Steam</i>	493,5525 kg/s
P	<i>Pressure Steam drum</i>	17728,31 kPaG

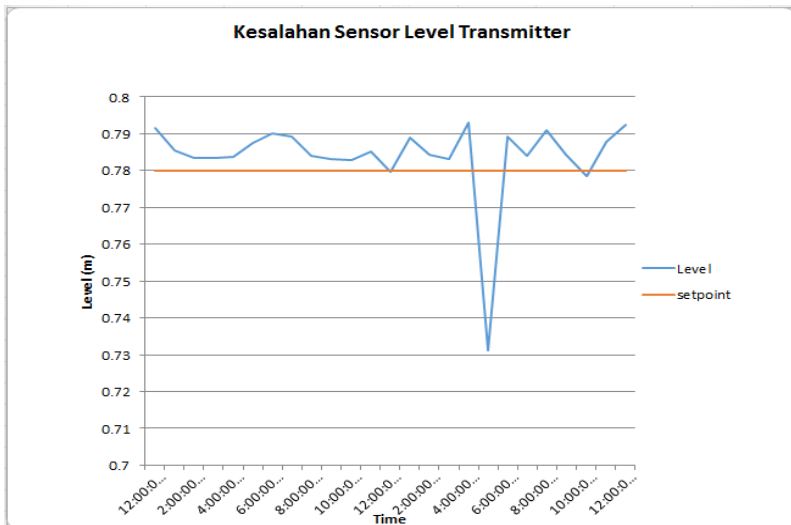
3.1.2 Data Kesalahan Sensor *Level Transmitter*

Adapun alasan lain yang menjadi latarbelakang perancangan *active fault tolerant control* pada sistem pengendali *level steam drum* ini adalah karena adanya kesalahan pembacaan pada sensor *level transmitter* yang menyebabkan performa sistem menurun. Berikut merupakan cuplikan data kesalahan pembacaan pada sensor *level transmitter*.

Tabel 3.3 Data Kesalahan Pembacaan Sensor *Level Transmitter*

No	Tanggal	Waktu	Set Point (m)	Level (m)	BFP A (%)	BFP B (%)
1	14 Jan17	00:00	0.78	0.792	24.55	24.55
2	14 Jan17	1:00	0.78	0.786	24.07	24.07
3	14 Jan17	2:00	0.78	0.783	23.96	23.96
4	14 Jan17	3:00	0.78	0.783	23.86	23.86
5	14 Jan17	4:00	0.78	0.784	23.76	23.76
6	14 Jan17	5:00	0.78	0.788	23.65	23.65
7	14 Jan17	6:00	0.78	0.79	23.55	23.55
8	14 Jan17	7:00	0.78	0.789	23.45	23.45
9	14 Jan17	8:00	0.78	0.784	23.35	23.35
10	14 Jan17	9:00	0.78	0.783	23.24	23.24
11	14 Jan17	10:00	0.78	0.783	23.36	23.36
12	14 Jan17	11:00	0.78	0.785	23.48	23.48
13	14 Jan17	12:00	0.78	0.78	23.01	23.01
14	14 Jan17	13:00	0.78	0.789	22.34	22.34
15	14 Jan17	14:00	0.78	0.784	22.74	22.74
16	14 Jan17	15:00	0.78	0.783	23.17	23.17
17	14 Jan17	16:00	0.78	0.793	23.68	23.68
18	14 Jan17	17:00	0.78	0.73	45.43	45.4
19	14 Jan17	18:00	0.78	0.789	25.44	25.44
20	14 Jan17	19:00	0.78	0.784	25.95	25.95
21	14 Jan17	20:00	0.78	0.791	24.9	24.9
22	14 Jan17	21:00	0.78	0.784	23.99	23.99
23	14 Jan17	22:00	0.78	0.779	23.17	23.17
24	14 Jan17	23:00	0.78	0.788	22.48	22.48
25	15 Jan17	24:00	0.78	0.792	22.39	22.39

Berdasarkan cuplikan data pengukuran level oleh sensor *level transmitter* pada tanggal 14 januari 2017 mulai pukul 00.00 sampai pukul 24.00 terdapat satu nilai pengukuran pada pukul 17.00 yang nilainya jauh dari nilai set point dan nilai pengukuran di sekitar pukul tersebut. Hal ini diindikasikan terjadi kesalahan pembacaan pada sensor *level transmitter* tersebut. Berikut merupakan grafik kesalahan pembacaan pada sensor *level transmitter*.



Gambar 3.2 Grafik Kesalahan Sensor *Level Transmitter*

3.2 Pemodelan

3.2.1 Pemodelan *Plant*

Untuk memodelkan steam drum digunakan hukum kesetimbangan massa. Hukum ini menyatakan bahwa jumlah massa yang masuk kedalam sistem sebanding dengan jumlah massa yang keluar dari sistem serta massa yang terakumulasi dalam sistem itu sendiri. Masukan pada steamdrum adalah flow feedwater dan keluarannya adalah flow steam. Adapun keluaran *steamdrum* yang lain yaitu flow water yang dialirkan menuju *water wall* melalui *boiler circulating pump* (BCP) diabaikan pada

pemodelan matematis *steamdrum* ini karena siklus proses terjadi secara kontinu dimana *flow water* tersebut akan diumpun balik ke *steamdrum* itu sendiri.

Dengan menggunakan persamaan hukum kesetimbangan massa, maka model matematis proses *Steam Drum* dapat dimodelkan sebagai berikut. Persamaan kesetimbangan massa input dan massa output [5]:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Laju Perubahan} \\ \text{massa dalam} \\ \text{steam drum} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Laju massa} \\ \text{Feedwater} \\ \text{input} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju massa} \\ \text{steam} \\ \text{output} \end{array} \right]$$

Karena laju perubahan massa dalam steam drum dibagi dalam 2 fase yaitu liquid/cair dan vapor/uap, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_w \frac{dV_L}{dt} + \rho_v \frac{dV_v}{dt} = \dot{m}_w - \dot{m}_v \quad (3.1)$$

Dimana:

$$\rho_w \frac{dV_L}{dt} = \text{laju perubahan massa liquid (kg/s)}$$

$$\rho_v \frac{dV_v}{dt} = \text{laju perubahan massa vapor (kg/s)}$$

$$\dot{m}_w = \text{laju massa water input (kg/s)}$$

$$\dot{m}_v = \text{laju massa vapor output (kg/s)}$$

Untuk fungsi level air dalam steam drum dapat dicari melalui hubungan volume tanki dengan ketinggian fluida. Dikarenakan bentuk tangki silinder horizontal maka, luas area untuk setiap ketinggian cairan adalah tidak sama. Maka perlu dicari hubungan antara volume tangki dengan ketinggian fluida. Dengan pendekatan model bentuk tangki adalah tabung maka, hubungan antara volume dan ketinggian adalah :

$$\frac{dV_L}{dt} = A \frac{dh}{dt} = W_t L \frac{dh}{dt} \quad (3.2)$$

Dimana :

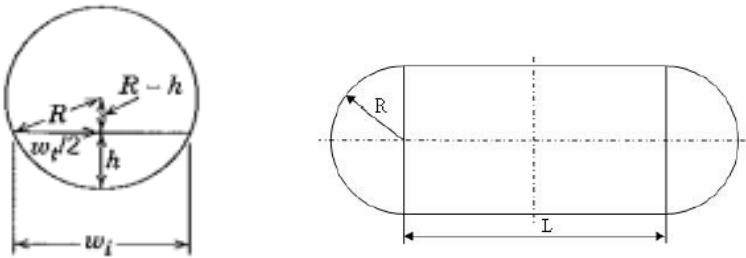
V_L : volume liquid dalam tabung (m^3)

A : luas area tabung (m^2)

W_t : luas permukaan cairan (m^2)

L : panjang tabung (m)

h : ketinggian cairan (m)



Gambar 3.3 Pendekatan dimensi volume tabung

$w_t/2$ merupakan panjang dari salah satu sisi segitiga. Dengan menggunakan rumus pythagoras, kita dapat mencari hubungan antara $w_t/2$ dengan h yaitu :

$$\frac{w_t}{2} = \sqrt{R^2 - (R - h)^2} \quad (3.3)$$

Atau

$$w_t = 2\sqrt{R^2 - (R - h)^2} \quad (3.4)$$

Disederhanakan menjadi :

$$w_t = 2\sqrt{(D-h)h} \quad (3.5)$$

Jika persamaan (3.5) disubstitusikan ke persamaan (3.2) maka, hubungan antara volume dan ketinggian cairan pada tangki adalah :

$$\frac{dV_L}{dt} = 2\sqrt{(D-h)h}.L \frac{dh}{dt} \quad (3.6)$$

Berdasarkan data desain dari *steamdrum boiler* PLTU unit 7, diketahui panjang tangki ($L=30.0228$ m), diameter dalam tangki ($D = 1.778$ m), dan ketinggian level yang dijaga di dalam tangki ($h = 0.789$ m) maka, persamaan (3.6) akan bernilai :

$$\frac{dV_L}{dt} = 53.04 \frac{dh}{dt} \quad (3.7)$$

Untuk perhitungan volume total steam drum didapatkan dari perhitungan volume bola penuh yang didapat dari 2 x setengah dimensi bola ditambah volume total tabung.

$$\begin{aligned} V_{tot} &= V_{bola} + V_{Tabung} \\ &= \frac{4}{3}\pi R^3 + \pi R^2 L \\ &= 2.94 + 74.54 \end{aligned}$$

$$V_{tot} = 77.48 \text{ m}^3$$

Sedangkan fungsi vapor dalam *steam drum boiler* dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \frac{dV_v}{dt} &= (V_{tot} - 53.04) \frac{dh}{dt} \\ \frac{dV_v}{dt} &= (77.48 - 53.04) \frac{dh}{dt} \end{aligned}$$

$$\frac{dV_v}{dt} = 24.44 \frac{dh}{dt} \quad (3.8)$$

Sehingga persamaan diatas menjadi:

$$\begin{aligned} \rho_w \frac{(53.04dh)}{dt} + \frac{(24.44dh)}{dt} (\rho_v V_v) &= \dot{m}_w - \dot{m}_v \\ \frac{d}{dt} \left(\rho_w \cdot 53.04 \frac{dh}{dt} + \rho_v \cdot 24.44 \frac{dh}{dt} \right) &= \frac{d}{dt} (\dot{m}_w - \dot{m}_v) \\ \rho_w \cdot 53.04 \frac{d^2 h}{dt^2} + \rho_v \cdot 24.44 \frac{d^2 h}{dt^2} &= \frac{d}{dt} (\dot{m}_w - \dot{m}_v) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dimana,

$$\dot{m}_v = K_{out} \times h(t) \quad (3.10)$$

$$K_{out} = \frac{\dot{m}_v}{h} \quad (3.11)$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\rho_w \cdot 53.04 \frac{d^2 h}{dt^2} + \rho_v \cdot 24.44 \frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{d}{dt} (\dot{m}_w - K_{out} h) \quad (3.12)$$

Kemudian persamaan diatas didekati dengan transformasi Laplace, sehingga menjadi:

$$(\rho_w \cdot 53.04 + \rho_v \cdot 24.44) s^2 H(s) = s(\dot{m}_w(s) - K_{out} H(s))$$

$$(\rho_w \cdot 53.04 + \rho_v \cdot 24.44) s H(s) = (\dot{m}_w(s) - K_{out} H(s))$$

$$H(s) [(\rho_w \cdot 53.04 + \rho_v \cdot 24.44) s + K_{out}] = \dot{m}_w(s)$$

$$H(s) = \frac{\dot{m}_w(s)}{(\rho_w \cdot 53.04 + \rho_v \cdot 24.44)s + K_{out}}$$

$$\frac{H(s)}{\dot{m}_w(s)} = \frac{\frac{1}{K_{out}}}{\frac{(\rho_w \cdot 53.04 + \rho_v \cdot 24.44)}{K_{out}}s + 1} \quad (3.13)$$

Berdasarkan pengambilan data di lapangan diperoleh data-data teknis sebagai berikut:

$$\rho_w = 0,68 \text{ kg/m}^3 \text{ (pada tekanan 18230,66 kPa, dan temperatur 322 C)}$$

$$\rho_v = 0,095 \text{ kg/m}^3 \text{ (pada tekanan 18381,21 kPa, dan temperatur 388 C)}$$

$$L = 30,0228 \text{ m}$$

$$D = 1,778 \text{ m}$$

$$K_{out} = 625,8039$$

Dengan memasukkan data-data yang diperoleh di lapangan, maka persamaan fungsi transfer menjadi:

$$\frac{H(s)}{\dot{m}_w(s)} = \frac{\frac{1}{625.8039}}{\frac{(0,68 \times 53.04 + 0,095 \times 24.44)}{625.8039}s + 1}$$

Sehingga fungsi transfer *plant* yang menggambarkan perubahan level *steam drum* terhadap perubahan laju aliran *feedwater* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{H(S)}{\dot{m}_w(S)} = \frac{0,0016}{0,06S+1} \quad (3.14)$$

3.2.2 Pemodelan Matematis Aktuator

Aktuator yang digunakan dalam sistem ini *turbine boiler feed pump* (BFP). *Turbine* BFP berfungsi sebagai pengatur besar laju aliran *feedwater* yang menuju *steamdrum*. Model matematis *turbine* BFP diperoleh dengan persamaan:

$$\frac{\dot{m}_w(S)}{U(S)} = \frac{K}{\tau S+1} \quad (3.15)$$

Dimana:

\dot{m}_w (s) = Manipulated variable berupa *flow feedwater* (kg/s)

K = Gain *Turbine BFP*

$U(s)$ = sinyal kontrol (mA)

τ = Time constant *Turbine BFP* asumsi 1 detik

Untuk menghitung *Gain turbine BFP* dengan menggunakan persamaan :

$$K = \left(\frac{\text{Span Output}}{\text{Span Input}} \right) \quad (3.16)$$

Span input adalah arus yang masuk dari kontroler yakni sinyal elektrik sebesar 4-20 mA, sedangkan *span output* adalah laju aliran *Feed Water* dengan laju aliran maksimum 569.15 kg/s maka perhitungan gain *turbine BFP* adalah sebagai berikut.

$$G_v = \frac{(569.15 - 0) \text{ kg / s}}{(20 - 4) \text{ mA}} = 35.57 \text{ kg/s.mA}$$

Sehingga, fungsi transfer *turbine BFP* terhadap di berikut.

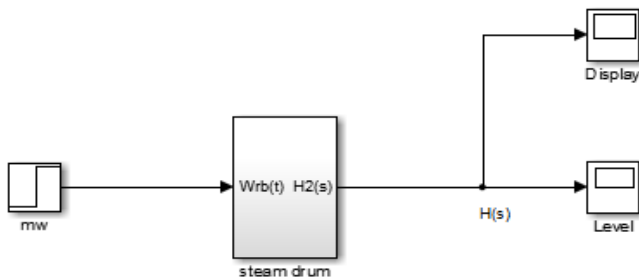
$$\frac{\dot{m}_w(s)}{U(s)} = \frac{35.57}{s+1} \quad (3.17)$$

3.2.3 Pemodelan Matematis *Level Transmitter* dan *Flow Transmitter*

Untuk *plant level*, sensor dari *plant* adalah *Differential Pressure Level Transmitter*, yaitu suatu alat yang berfungsi untuk mengukur *level* air pada *steam drum* dengan memanfaatkan perbedaan tekanan yang didapat masing-masing *tube transmitter*. Pemodelan pada sensor menggunakan nilai 1 agar nilai keluaran dari sensor menuju unit pengendali merepresentasikan nilai *level* yang terukur [10].

3.3 Validasi Model

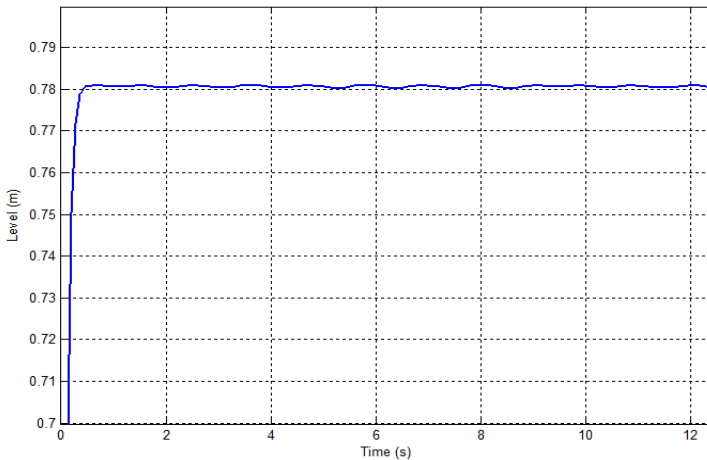
Setelah mendapatkan pemodelan matematis sistem, maka pemodelan tersebut divalidasi menggunakan software Matlab R2013a untuk mengetahui apakah pemodelan tersebut sudah menggambarkan keadaan *plant* yang sebenarnya di PLTU Unit 6 Paiton. Validasi dilakukan dengan uji open loop fungsi transfer *steam drum* terhadap laju aliran air yang diberikan. Diagram blok validasi model akan ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.4. Skema Validasi Model

Pengujian dilakukan dengan memberikan besar laju aliran sebesar 488,1 kg/s. Grafik respon validasi model ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pada grafik tersebut terlihat bahwa *level* yang terbaca

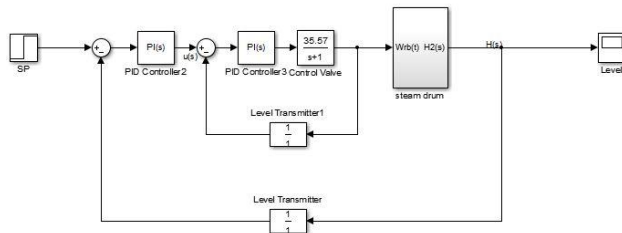
pada *plant* adalah 0,7808 m. Nilai tersebut mendekati dengan level steam drum boiler pada kondisi normal yakni 0,789 m dengan *error* sebesar 1,04%. Besar nilai *error* tersebut $\leq 2\%$ sehingga model tersebut dapat dikatakan valid.



Gambar 3.5. Grafik Respon Validasi Model

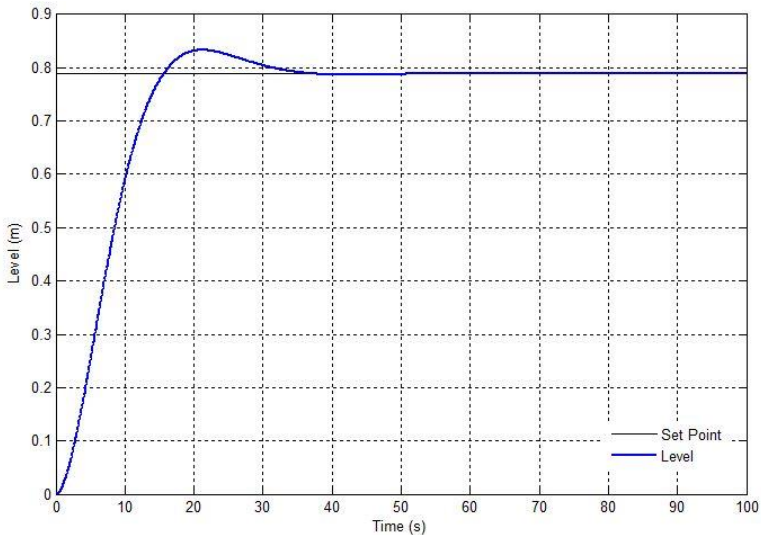
3.4 Perancangan Kontroler PI

Pengendalian level pada *steamdrum boiler* menggunakan mode kontrol *cascade* dengan pengendali level sebagai *primary* atau *master loop*, dan pengendali *flow* sebagai *secondary* atau *slave loop* dengan menggunakan algoritma kontrol PI. Untuk menentukan *gain* pengendali PI menggunakan metode *trial and error* hingga memenuhi kriteria *error steady state* $\leq 2\%$. Nilai parameter PI untuk *master controller* adalah K_p sebesar 10,8 dan T_i sebesar 0,12. Nilai parameter PI untuk *slave controller* adalah K_p sebesar 0,0076 dan T_i sebesar 1. Setelah itu sistem disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab 2013a dengan skema seperti Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema Diagram Blok Perancangan Pengendali PI

Berdasarkan Gambar 3.6 *setpoint* yang digunakan adalah besaran level dalam satuan meter, sinyal kontrol dari *level controller* menjadi *set point* bagi *flow controller*. *Output* dari *steam drum* berupa ketinggian air dalam satuan meter. Berikut merupakan respon sistem ketika diberikan set point sebesar 0,789 m.



Gambar 3.7 Grafik Respon Perancangan Kontroler PI

Berdasarkan respon sistem tersebut dapat diketahui karakteristik respon sistem yakni *settling time* sebesar 40 detik dan *maximum overshoot* sebesar 5,56% serta *error steady state* sistem sebesar

0,3%.

3.5 Perancangan Active Fault Tolerance Control (AFTC)

Perancangan *active fault tolerance control* (AFTC) terdiri dari dua tahap, yakni perancangan *observer*, dan rekonfigurasi kontrol.

3.5.1 Perancangan *Observer*

Observer berfungsi untuk mendeteksi perubahan akibat kesalahan yang terjadi pada sensor level transmitter. Langkah pertama dalam merancang observer adalah merubah fungsi transfer sistem ke dalam bentuk matriks. Berdasarkan persamaan 2.5 dan 2.6 maka fungsi transfer sistem dapat digambarkan menjadi bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{dH(t)}{dt} \\ \frac{d\dot{m}_w(t)}{dt} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} + [B][u(t)] \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} + [D][u(t)] \quad (3.19)$$

Untuk mencari nilai A didapatkan dari fungsi transfer plant dan actuator seperti pada persamaan 3.14 dan persamaan 3.17.

- Fungsi transfer *plant*

$$\frac{H(S)}{\dot{m}_w(S)} = \frac{0,0016}{0,06S + 1}$$

$$H(S)(0,06S + 1) = 0,0016 \dot{m}_w(S)$$

$$0,06S H(S) + H(S) = 0,0016 \dot{m}_w(S)$$

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{0,0016}{0,06} \dot{m}_w(t) - \frac{1}{0,06} H(t)$$

$$\frac{dH(t)}{dt} = 0,0260\dot{m}_w(t) - 16,3016 H(t) \quad (3.20)$$

- Fungsi transfer aktuator

$$\frac{\dot{m}_w(S)}{U(S)} = \frac{35,57}{S + 1}$$

$$\dot{m}_w(S)(S + 1) = 35,57 U(S)$$

$$S\dot{m}_w(S) + \dot{m}_w(S) = 35,57 U(S)$$

$$S\dot{m}_w(S) = 35,57 U(S) - \dot{m}_w(S)$$

$$\frac{d\dot{m}_w(t)}{dt} = 35,57 u(t) - \dot{m}_w(t) \quad (3.21)$$

Matriks A adalah matriks yang menyatakan *state* sistem.

Berdasarkan penjabaran dari fungsi transfer plant dan actuator tersebut, maka matriks A bernilai:

$$A = \begin{bmatrix} -16,3016 & 0,0260 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Matriks B merupakan matriks yang menyatakan input kontrol sistem. Untuk mencari nilai matriks B didapatkan dari fungsi transfer aktuator, sehingga matriks B bernilai:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 35,57 \end{bmatrix}$$

Matriks C merupakan matriks output sistem dan merupakan matriks identitas sehingga matriks C bernilai:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriks D merupakan matriks yang menyatakan *noise* sistem, jika diasumsikan tidak terjadi *noise* maka matriks D bernilai:

$$D = 0$$

Matriks kesalahan terdapat dua macam, yakni kesalahan aktuator (Fa) dan sensor (Fs). Dalam tugas akhir ini hanya dianalisa kesalahan sensor, sehingga matriks Fa dan Fs bernilai:

$$Fa = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Fs = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dari matriks A,B,C,D di atas kemudian disubstitusi ke persamaan 3.18 dan persamaan 3.19 sehingga menjadi persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \frac{dH(t)}{dt} \\ \frac{d\dot{m}_w(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -16,3016 & 0,0260 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 35,57 \end{bmatrix} [u(t)] \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(t) \\ \dot{m}_w(t) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.12 sampai dengan persamaan 2.14 maka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat diekspansi menjadi

$$Aa = \begin{bmatrix} -16.3016 & 0.0260 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Ba = \begin{bmatrix} 0 \\ 35.57 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Ca = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Ea = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga matriks ruang keadaan dapat diekspansi lagi menjadi bentuk berikut.

$$Aa = \begin{bmatrix} -16.3016 & 0.0260 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

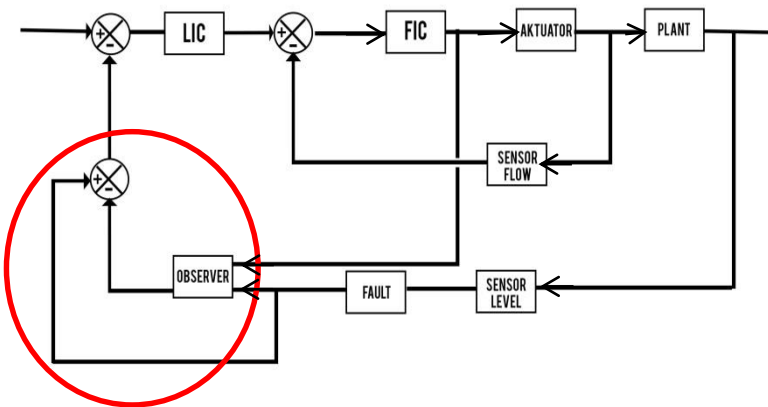
$$\tilde{C}_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Menyelesaikan *Observer* maka diperlukan pemilihan dari nilai *pole*, nilai *pole* sistem yang dipakai adalah

$$\begin{aligned} p1 &= (-15.6476 + 0.0000i) \\ p2 &= (-0.8488 + 1.690i) \\ p3 &= (-0.8488 - 1.690i) \\ p4 &= (-0.6671 + 1.0083i) \\ p5 &= (-0.6671 + 1.0083i) \\ p6 &= (0.000001 + 0.0000i) \end{aligned}$$

3.3.2 Perancangan Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol merupakan tahap akhir untuk merancang AFTC yang bertujuan untuk mengembalikan kestabilan sistem ketika terjadi kesalahan sehingga plant tetap dapat beroperasi dalam kondisi normal. Perancangan skema AFTC dibentuk dari *gain control* yang telah didapatkan dan skema rekonfigurasi kontrol ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Skema Perancangan Rekonfigurasi Kontrol

Rekonfigurasi kontrol ditunjukkan pada lingkaran merah pada gambar di atas. Skema rekonfigurasi kontrol tersebut disusun berdasarkan persamaan 2.20 yang merupakan pengurangan dari nilai kesalahan pembacaan sensor dengan nilai estimasi kesalahan *observer*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

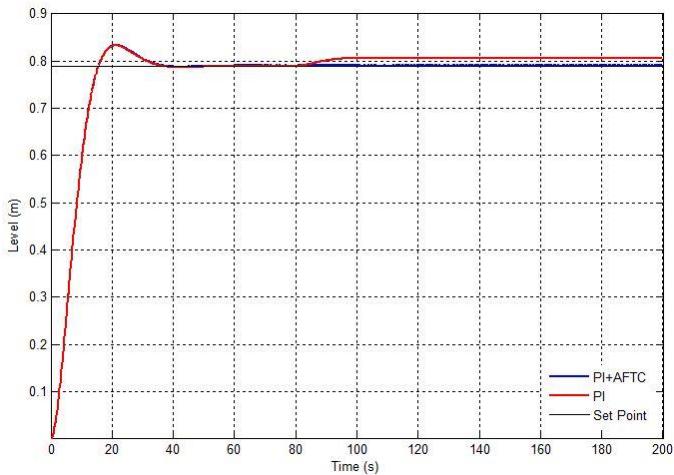
Pada bab ini akan dijabarkan hasil perancangan *active fault tolerant control* (AFTC) pada sistem pengendalian level yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan software MATLAB untuk selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Uji performansi sistem dilakukan guna mengetahui algoritma AFTC yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik atau tidak untuk menolerir kesalahan pada sensor level *transmitter*. Kesalahan sensor yang diberikan berupa kesalahan sensitivitas, dan bias. Parameter yang digunakan untuk menilai performansi sistem pengendalian diantaranya adalah *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*. Penilaian terhadap uji dilakukan pada kondisi saat diberikan kesalahan yakni pada detik ke-80.

4.1 Uji Kesalahan Sensitivitas

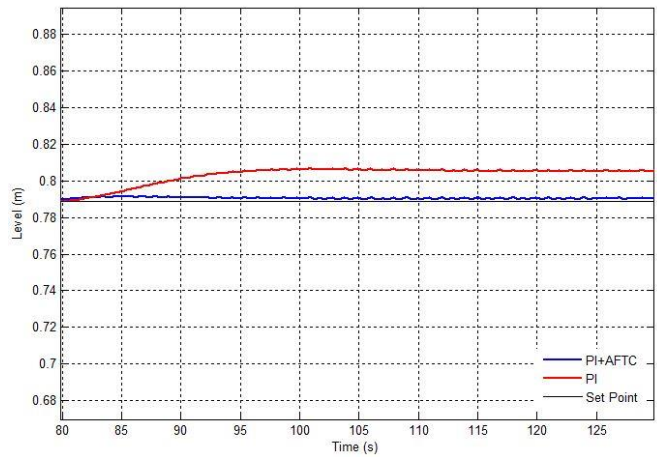
Untuk menguji performansi dari sistem pengendalian level maka diberikan kesalahan pada sensor level *transmitter* berupa kesalahan sensitivitas. Sensitivitas berkaitan dengan seberapa peka sebuah sensor tersebut dalam menanggapi perubahan besaran fisis yang terjadi. Kesalahan sensitivitas adalah kesalahan nilai keluaran sensor karena kurang sensitifnya sensor sehingga sensor tidak memberikan sinyal keluaran sebesar yang seharusnya dikeluarkan. Besar nilai kesalahan sensitivitas yang diberikan pada pengujian yakni 2%,5%,8%, dan 15% [11].

4.1.1 Uji Kesalahan Sensitifitas 2 %

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-80.



Gambar 4.1 Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 2%



Gambar 4.2 Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 2 %

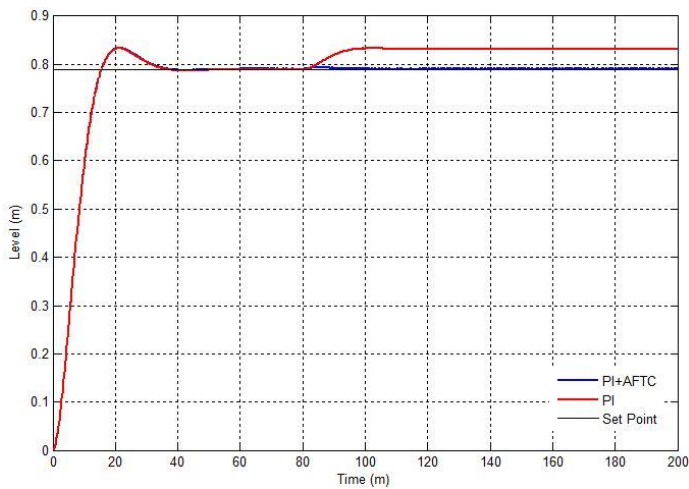
Tabel 4.1. Parameter Performansi dengan Kesalahan Sensitivitas 2% Pada Kondisi diberi kesalahan

No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0,3 %	2.27 %
2	<i>Settling Time</i>	15 detik	20 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,25 %	2.14 %

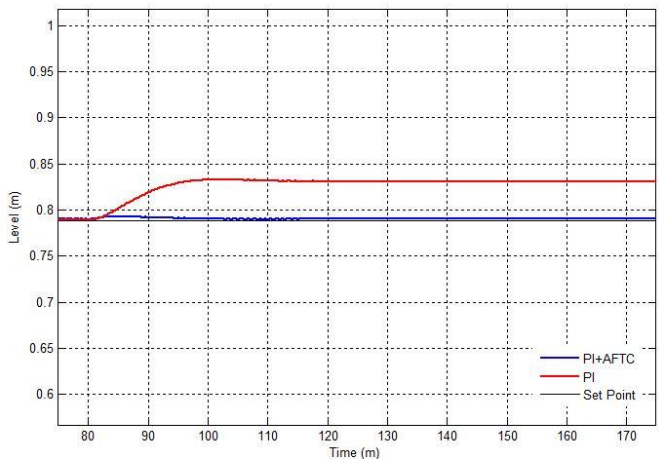
Pada Gambar 4.1 dan Tabel 4.1 dapat diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 2% Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 2% dari sinyal *output*-nya. *Maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali PI dengan AFTC lebih kecil dari pengendali PI tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 0,3 % lebih kecil dari PI biasa sebesar 2,27 %. Waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari PI dengan AFTC sebesar 15 detik, sedangkan PI tanpa menggunakan AFTC memiliki *settling time* lebih lama yakni sebesar 20 detik namun demikian tidak bisa menolerir kesalahan yang terjadi. Pengendali PI tanpa AFTC tidak mampu kembali menuju setpoint semula karena kesalahan sensor level *transmitter* sehingga *error steady state* yang terjadi sebesar 2,14%. Hasil tersebut lebih besar dari PI dengan AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,25%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PI yang dilengkapi dengan AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.1.2 Uji Kesalahan Sensitivitas 5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-80.



Gambar 4.3 Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 5%



Gambar 4.4 Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 5%

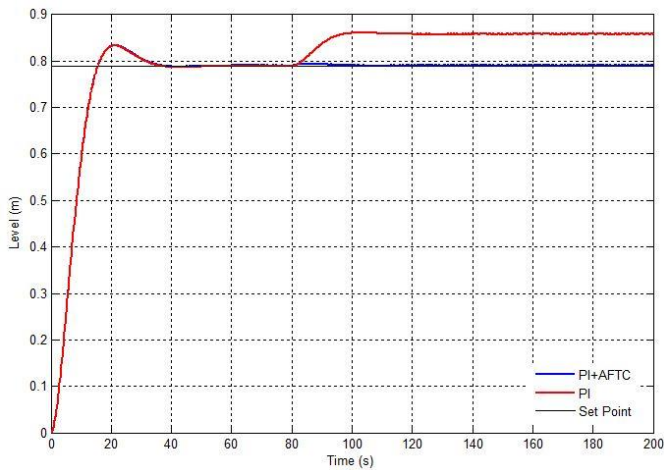
Tabel 4.2. Parameter Performansi dengan Kesalahan *Sensitivitas* 5% Pada Kondisi Diberi Kesalahan

No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0,5 %	5,61 %
2	<i>Settling Time</i>	17 detik	23 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,2 %	5,34 %

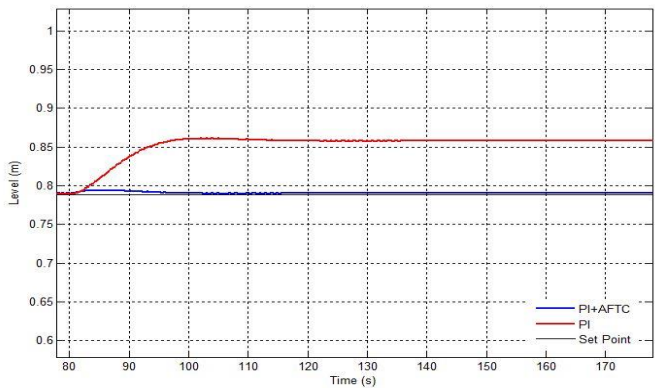
Pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.2 dapat diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 5% Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 5% dari sinyal *output*-nya. *Maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali PI dengan AFTC lebih kecil dari pengendali PI tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 0,5 % lebih kecil dari PI biasa sebesar 5,61 %. Waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari PI dengan AFTC sebesar 17 detik, sedangkan PI tanpa menggunakan AFTC memiliki *settling time* lebih lama yakni sebesar 23 detik namun demikian tidak bisa menolerir kesalahan yang terjadi. Pengendali PI tanpa AFTC tidak mampu kembali menuju setpoint semula karena kesalahan sensor level *transmitter* sehingga *error steady state* yang terjadi sebesar 5,34%. Hasil tersebut lebih besar dari PI dengan AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,2%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PI yang dilengkapi dengan AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.1.3 Uji Kesalahan Sensitivitas 8 %

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-80



Gambar 4.5 Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 8 %



Gambar 4.6 Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 8%

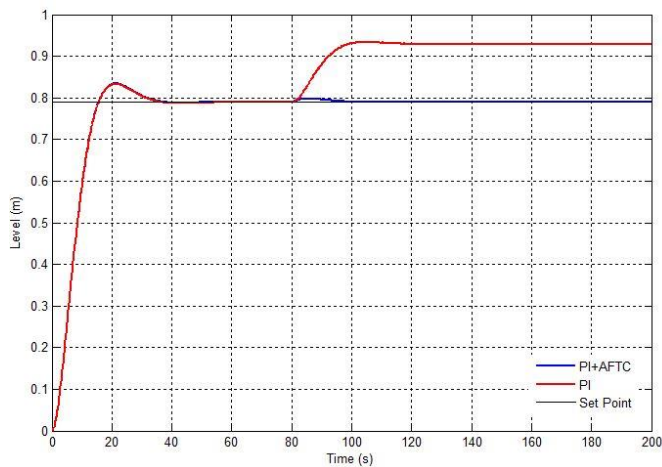
Tabel 4.3. Parameter Performansi dengan Kesalahan *Sensitivitas* 8% Pada Kondisi diberi kesalahan

No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0,71 %	9,18 %
2	<i>Settling Time</i>	20 detik	30 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,22 %	8,78 %

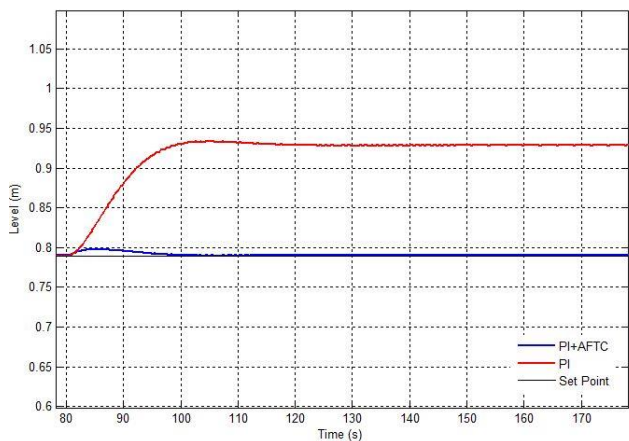
Pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.3 dapat diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 8%. Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 8% dari sinyal *output*-nya. *Maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali PI dengan AFTC lebih kecil dari pengendali PI tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 0,71 % lebih kecil dari PI biasa sebesar 9,18 %. Waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari PI dengan AFTC sebesar 20 detik, sedangkan PI tanpa menggunakan AFTC memiliki *settling time* lebih lama yakni sebesar 32 detik namun demikian tidak bisa menolerir kesalahan yang terjadi. Pengendali PI tanpa AFTC tidak mampu kembali menuju setpoint semula karena kesalahan sensor level *transmitter* sehingga *error steady state* yang terjadi sebesar 8,78%. Hasil tersebut lebih besar dari PI dengan AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,22%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PI yang dilengkapi dengan AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

4.1.4 Uji Kesalahan Sensitivitas 15 %

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan akan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan (*fault*) pada detik ke-80.



Gambar 4.7 Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 15%



Gambar 4.8 Perbesaran Respon Sistem dengan kesalahan sensitivitas 15%

Tabel 4.4. Parameter Performansi dengan Kesalahan *Sensitivitas* 15% Pada Kondisi diberi kesalahan

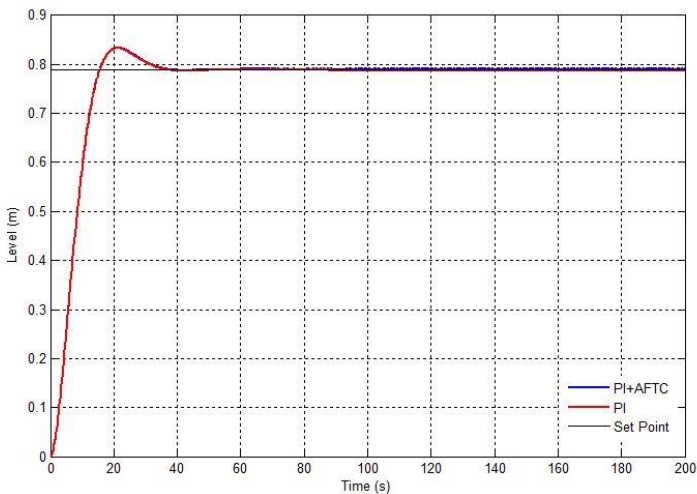
No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	1,15 %	18,36 %
2	<i>Settling Time</i>	25 detik	33 detik
3	<i>Error steady state</i>	0.23 %	17,74 %

Pada Gambar 4.7 dan Tabel 4.4 dapat diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas 15% Kesalahan sensitivitas tersebut berarti sensor kehilangan 15% dari sinyal *output*-nya. *Maximum overshoot* yang terjadi pada pengendali PI dengan AFTC lebih kecil dari pengendali PI tanpa menggunakan AFTC saat dikenai kesalahan yakni sebesar 1,15 % lebih kecil dari PI biasa sebesar 18,36 %. Waktu untuk mencapai keadaan *steady* (*settling time*) dari PI dengan AFTC sebesar 25 detik, sedangkan PI tanpa menggunakan AFTC memiliki *settling time* lebih lama yakni sebesar 32 detik namun demikian tidak bisa menolerir kesalahan yang terjadi. Pengendali PI tanpa AFTC tidak mampu kembali menuju setpoint semula karena kesalahan sensor level *transmitter* sehingga *error steady state* yang terjadi sebesar 17,74%. Hasil tersebut lebih besar dari PI dengan AFTC yang hanya memiliki *error steady* sebesar 0,23%. Hal ini membuktikan bahwa pengendali PI yang dilengkapi dengan AFTC dapat meningkatkan performansi dari suatu sistem dan dapat menolerir kesalahan sensor.

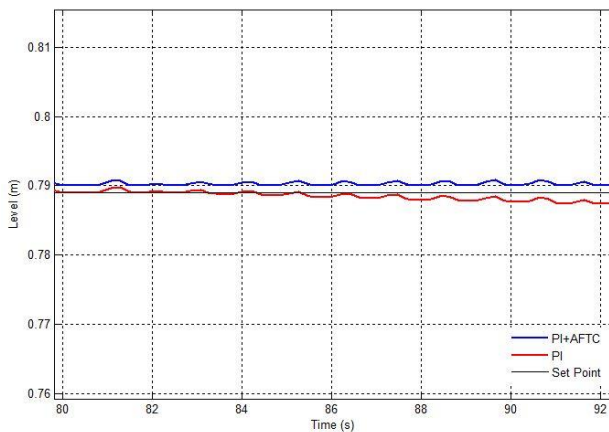
4.2 Uji Kesalahan Bias

Untuk menguji performansi dari sistem pengendalian level maka diberikan kesalahan pada sensor level *transmitter* berupa kesalahan bias. Bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Bias dalam pengukuran juga bisa disebut dengan nilai *Error Sistematis*. *Error Sistematis* mendeskripsikan *error* pada pembacaan *output* sistem pengukuran yang secara konsisten (*error steady state*) pada satu sisi pembacaan yang benar, yaitu seluruh *error* adalah positif atau seluruh *error* adalah negatif [12]. Semakin kecil nilai biasnya maka nilai *error steady state* juga semakin kecil begitupun sebaliknya. Nilai bias yang diberikan pada uji ini adalah $\pm 0,25\%$ dari span pengukuran level transmitter. Nilai tersebut merupakan standar nilai kesalahan bias yang diperbolehkan pada PLTU Paiton Unit 7. Kesalahan Bias diberikan pada detik ke- 80. Hasil respon sistem dengan kesalahan bias dapat dilihat pada gambar berikut.

4.2.1 Uji Kesalahan Bias +0,25%



Gambar 4.9 Respon Sistem dengan Kesalahan Bias +0,25%

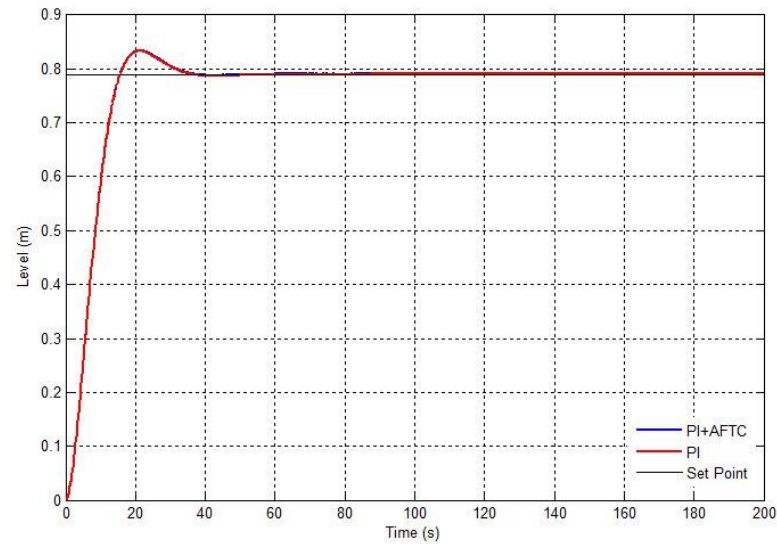


Gambar 4.10 Grafik Perbesaran Respon Kesalahan Bias $+0,25\%$

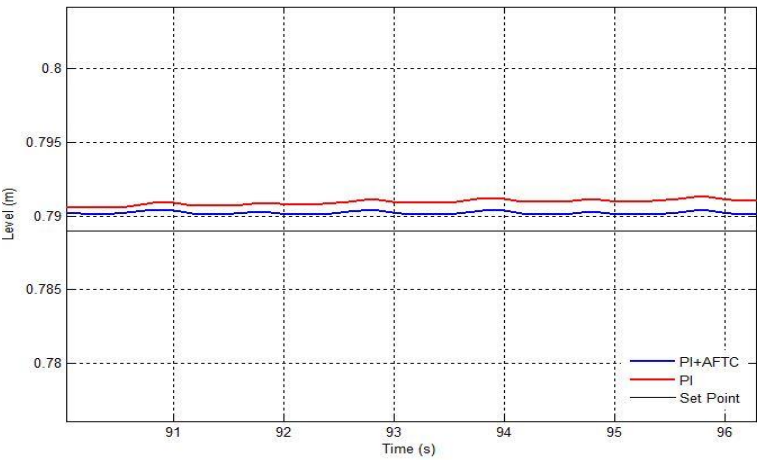
Tabel 4.5. Parameter Performansi dengan Kesalahan bias $+0,25\%$
Pada Kondisi diberi kesalahan

No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0,23 %	0,24 %
2	<i>Settling Time</i>	4 detik	10 detik
3	<i>Error steady state</i>	0,23 %	0,24 %

4.2.1 Uji Kesalahan Bias -0,25%



Gambar 4.11 Respon Sistem dengan Kesalahan Bias -0,25%



Gambar 4.12 Grafik Perbesaran Respon Kesalahan Bias -0,25%

Tabel 4.6. Parameter Performansi dengan Kesalahan bias $-0,25\%$
Pada Kondisi diberi kesalahan

No	Parameter	PI dengan AFTC	PI tanpa AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	0.19 %	0,28 %
2	<i>Settling Time</i>	10 detik	13 detik
3	<i>Error steady state</i>	0.19 %	0,28 %

Pada Gambar 4.9 dan 4.11 serta parameter performansi sistem yang tampak pada tabel 4.5 dan 4.6, terlihat bahwa respon sistem pengendali PI dengan algoritma AFTC tidak terlalu berbeda signifikan dengan pengendali PI tanpa AFTC dalam mengatasi kesalahan bias sebesar $\pm 0,25\%$, namun demikian masih lebih baik sistem pengendalian PI dengan algoritma AFTC.

Dari segi parameter performansi sistem, baik *maximum overshoot*, *error steady state*, maupun *settling time*, sistem pengendalian dengan algoritma AFTC memiliki nilai lebih kecil daripada sistem pengendalian tanpa algoritma AFTC. Semakin kecil nilai parameter tersebut, maka semakin baik performa sistem tersebut. Hal ini disebabkan oleh adanya rekonfigurasi kontrol untuk mengatasi kesalahan yang disebabkan oleh kesalahan sensor level transmitter. Maka dari itu, sistem pengendalian yang menggunakan algoritma AFTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendalian tanpa menggunakan algoritma AFTC.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Active Fault Tolerant Control* pada Sistem Pengendalian Level *Steamdrum Boiler* di PLTU Paiton dengan Kesalahan pada Sensor adalah sebagai berikut:

- a. Perancangan AFTC pada sistem pengendalian level *steamdrum boiler* yang telah dilakukan mampu menolerir kesalahan sensor, yakni kesalahan sensitivitas 2%-15% dan kesalahan bias 0,25%, sehingga mampu menjaga kestabilan sistem.
- b. Performa sistem pengendali PI yang dilengkapi algoritma AFTC lebih baik daripada sistem pengendali PI tanpa AFTC dalam menolerir adanya kesalahan sensor yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dari hasil uji kesalahan sensor sebagai berikut:
 - Pada uji kesalahan sensitivitas 8%, sistem pengendali PI yang dilengkapi AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,71%, *settling time* 20 detik, dan *error steady state* sebesar 0,22 %, sedangkan sistem pengendali PI tanpa AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 9,18%, *settling time* 30 detik, dan *error steady state* sebesar 8,78%.
 - Pada uji kesalahan bias +0,25%, sistem pengendali PI yang dilengkapi AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,23%, *settling time* 4 detik, dan *error steady state* sebesar 0.23%, sedangkan sistem pengendali PI tanpa AFTC menghasilkan *maximum overshoot* sebesar 0,24%, *settling time* 10 detik, dan *error steady state* sebesar 0,24%.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya mengenai AFTC adalah meninjau tidak hanya kesalahan pada sensor, melainkan kesalahan pada aktuator agar sistem pengendali AFTC tersebut mampu menolerir kesalahan baik yang terjadi pada sensor maupun pada aktuator.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Astrom, K.J.; Bell, R.D., "Drum-Boiler Dynamic," *Elsevier*, no. 36, pp. 363-378, 2000
- [2] Verma, Om Prakash; Manik, Gaurav, "Comparative Analysis of Boiler Drumlevel Control Using Advanced Classical Approach," *international Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, vol. II, no. 2, 2013.
- [3] Zhang, Youmin; Jiang, Jin, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control System," *ELSEVIER*, pp. 229-252, 2008.
- [4] Anonym. P&ID Steam Drum PLTU Paiton Unit 7. PT POMI
- [5] Prihantya, Muhammad R. "Perancangan Sistem Pengendalian Level dan Interlock pada Steam Drum dengan tiga elemen kontrol di PG". Gempolkrep – Mojokerto. ITS. 2013
- [6] Noura, Hassan; Theilliol, Didier; Ponsart, Jean Christophe; Chamseddin, Abbas, Fault-Tolerant Control System, London: Springer, 2009.
- [7] Indriawati, Katherin; Agustinah, Trihastuti; Jazidie, Achmad , "Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults," *IEEE*, 2013
- [8] Katsuhiko, Ogata, Modern Control Engineering, New Delhi: Prentice-Hall, 2010
- [9] Indriawati.Katherin, N.Sebe, T. Agustinah, A. Jazidie,"Robust Fuzzy Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear System with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive,"

International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO),
Vol.8,N. 6 ISSN 1974-6059, 2015.

- [10] Restu, Firdausa R. “Perancangan Active Fault Tolerat Control pada steam drum boiler PLTU Paiton Jawa Timur dengan kesalahan pada aktuator”. ITS. 2015
- [11] Ardhiyanta, Azwar. “Perancangan Active Fault Tolerat Control pada Sistem Pengendalian Temperature Fuel Gas Superheater Burner PT Petrokimia Gresik dengan Kesalahan Sensor Temperature”.ITS. 2016
- [12] Musyafa, A, “Sistem Pengukuran dan Kalibrasi: Kesalahan Pengukuran”, Teknik Fisika ITS,2012

LAMPIRAN A
PROCESS DIAGRAM DAN P&ID STEAM DRUM BOILER
PLTU UNIT 7 PAITON

LAMPIRAN B
CALIBRATION SHEET LEVEL TRANSMITER

DPC/TRACK

Tag ID	7FW-LT-370A	Serial Number	0276269
Test Type	74X Analog	Manufacturer	
		Model Number	
Test Date	04/25/2015	Function	
Test Time	14:01:22	Instrument Type	
		Temperature	
Final Status	Passed	Humidity	
Input Low	1,299	Output Low	4
Input High	30	Output High	20
Input Units	mmH2O	Output Units	mA
Input Unit Type	Normal	Output Unit Type	Normal
Source Function	Pressure	Measure Function	Current
Source Mode	Automatic	Measure Mode	Automatic
Amplitude	0.0 V	Square Root	No
		Loop Power	24V
Tolerance	0.250 %		

As Found

Input	Output	%Error	
1,299	4.012	0.070%	Result Passed
982	8.019	0.140%	
665	11.996	0.010%	Max. Dev. 0.140%
347	16	-0.020%	
30	19.998	-0.010%	Linearity 0.057%
347	16.011	0.050%	
665	11.998	0.030%	
982	8.014	0.110%	
1,299	4.019	0.120%	

As Left

Input	Output	%Error	
			Result
			Max. Dev.
			Linearity

Sensor Data

SN: 70000515
Model: FLUKE-700P05
Date: 1/20/1998, 23:18:53
Zeroed: NO

Procedure

Testers

03GDB03CP1101

Reason For Work

Action(s) Taken

Problem(s)

Comments

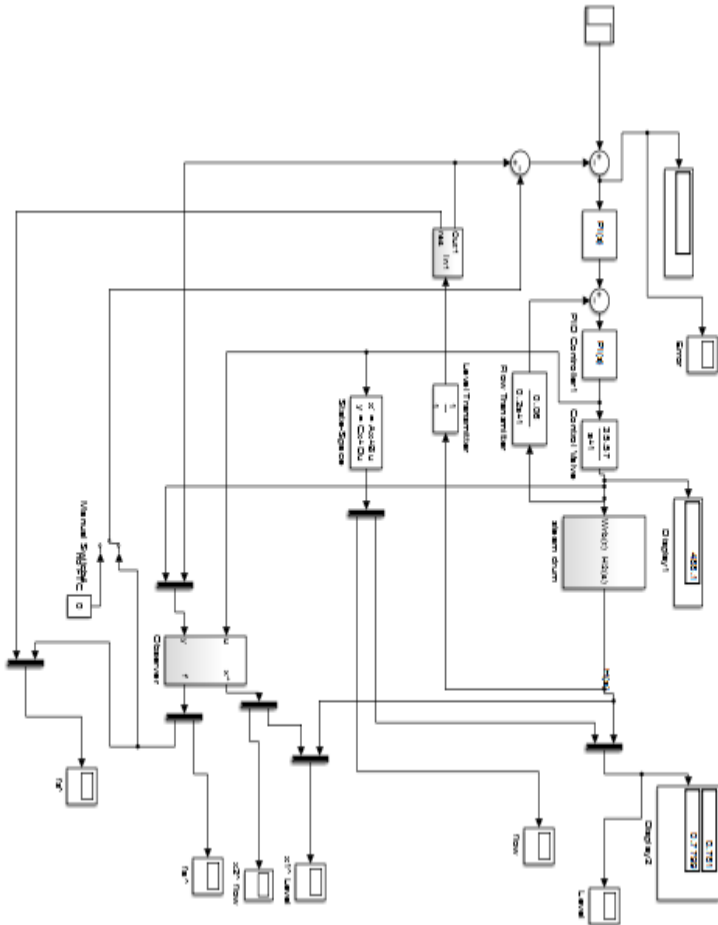
Test Equipment Used

Manufacturer	Model Number	Serial Number	Due Date	Cert. Status
--------------	--------------	---------------	----------	--------------

Valued Fluke Customer
4/25/2015

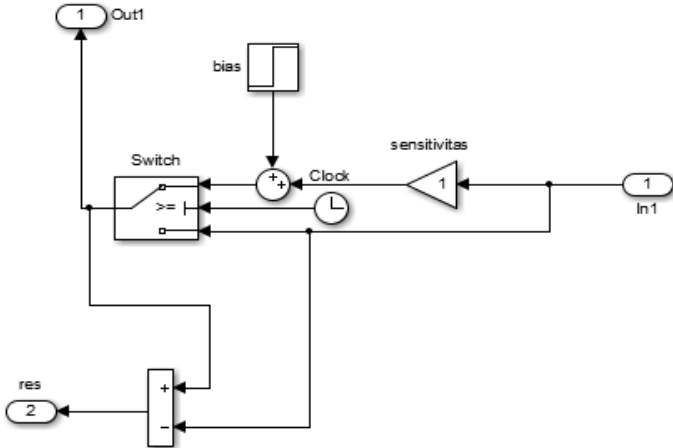
LAMPIRAN C

SKEMA AFTC PADA SIMULINK MATLAB

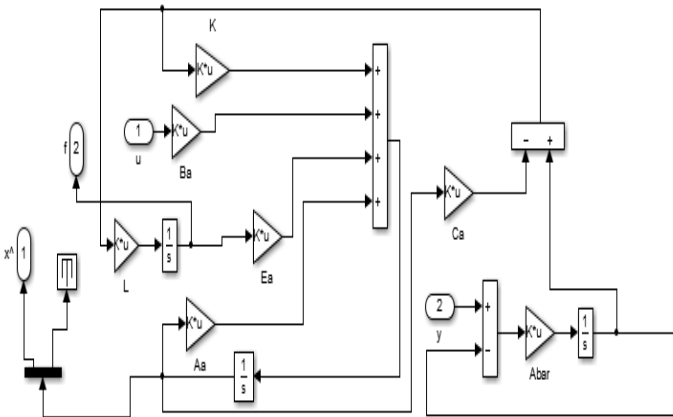


LAMPIRAN D

SKEMA FAULT SENSOR



SKEMA OBSERVER



LAMPIRAN E

SOURCE CODE MATLAB PENCARIAN GAIN OBSERVER

```
rho_vapor=0.095;
rho_water=0.68;
Volum_water=53.04;
Volum_Vapor=24.44;
Kout=625.8039;
A=[-
Kout/((rho_water*Volum_water)+(Volum_Vapor*rho_vapor))
1/((rho_water*Volum_water)+(Volum_Vapor*rho_vapor));0 -1] %Matriks A
B=[0;35.57]%Matriks B
C=[1 0;0 1]%Matriks C
n = length(A);
p = size(C,1);
m = size(B,2);
Fa=[0;0];
Fs=[1;0];
fs = size(Fs,2);
fa = size(Fa,2);
Abar = 1*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar]
Ba = [B;zeros(p,m)]
Ea = [Fa zeros(n,fs); zeros(p,fa) Abar*Fs]
Ca = [zeros(p,n) eye(p)]
Atild = [Aa Ea; zeros(fa+fs,n+p) zeros(fa+fs)];
Ctild = [Ca zeros(p,fa+fs)];
rank(Atild);
rank(observ(Atild,Ctild));
p1=-15.6476 + 0.0000i;
p2= -0.8488 + 1.6901i;
p3= -0.8488 - 1.6901i;
p4=-0.6671 + 1.0083i;
p5=-0.6671 - 1.0083i;
p6=-0.000000000000000001 + 0.0000i;
Ktild = place(Atild',Ctild',[p1 p2 p3 p4 p5
p6]);
```

```
K = Ktild(:,1:n+p)
L = Ktild(:,n+p+1:n+p+fa+fs)
```


BIODATA PENULIS



Penulis bernama Ardhiansyah Widhi Harsono, dengan nama panggilan Widhi. Penulis dilahirkan di Malang pada tanggal 10 Juli 1994 sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara dari ayahanda Herdianto Tri Agus P dan ibunda Siti Nurayah. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Negeri 7 Kepanjen tahun (2001–2007), SMP Negeri 4 Kepanjen tahun (2007–2010), SMA Negeri 1 Kepanjen tahun (2010–2013).

Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2013. Semasa perkuliahan, Penulis aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan, yakni pada Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol Departemen Teknik Fisika ITS sebagai kepala divisi Maintenance and Equipment, dan UKM Robotika sebagai staff divisi Humas dan Workshop. Penulis dapat dihubungi melalui email: ardhiansyahwidhi@gmail.com.